

高掺杂浓度掺镱光纤的光子暗化效应*

朱宗玖¹ 许立新² 毛庆和^{1**} 刘文清¹

(1 中国科学院安徽光学精密机械研究所, 合肥 230031)

(2 中国科学技术大学物理系, 合肥 230026)

摘 要 采用光纤激光器和放大器结构方案, 观察到了高浓度掺镱光纤(YDF)的光子暗化(Photo-darkening)现象. 对激光器阈值和输出功率、放大器输出谱的测量结果表明, 光子暗化效应导致了高掺杂浓度 YDF 的功率转换效率随泵浦作用时间的增加而下降, 且下降为单调不可逆过程, 但随着泵浦时间的增加, 这种下降逐渐变缓、功率转换效率最终可趋于稳定.

关键词 掺杂浓度; 掺镱光纤(YDF); 光子暗化效应(Photo-darkening); 光纤激光器; 光纤放大器

中图分类号 TN253; TN248 **文献标识码** A **文章编号** 1004-4213(2007)01-0026-4

0 引言

自 80 年代末起, 稀土掺杂玻璃光纤激光器一直是纤维光学、光通信以及激光技术的研究重点, 迄今, 稀土掺杂光纤激光器已可实现单纵模连续波、高速超短脉冲、多波长和大功率等运转方式^[1-5], 但是, 光纤激光器的稳定性问题依然有待于研究解决. 大量研究结果表明, 造成激光器不稳定的主要原因来源于环境声波噪音的影响. 为了降低或抑制这种不利影响, 最为有效的方案是减小激光器腔长^[6], 因此, 所用掺杂光纤长度也须相应减小. 为了克服因减小掺杂光纤长度对输出功率所造成的不利影响, 必须提高掺杂光纤的掺杂浓度. 然而, 提高掺杂浓度将涉及一系列诸如浓度淬灭等材料问题. 尽管掺杂光纤的浓度在近年来已有很大提高, 并出现了基于高掺杂浓度的掺铒和掺镱光纤 DFB 激光器^[7-8], 但迄今为止, 只有掺有镱离子的玻璃光纤可以容易地获得高掺杂浓度, 如掺镱光纤和铒镱共掺光纤等.

虽然高浓度掺镱光纤(Ytterbium-doped fibers, YDFs)无浓度淬灭问题, 但是, 高掺杂浓度 YDF 存在着激发态寿命淬灭, 导致强烈的非可饱和吸收, 从而影响激光器件的效率^[9]; 此外, 在许多稀土掺杂玻璃中, 如掺铊、掺镓、掺铈、掺铟等, 还存在着受激光辐射的永久性退化, 即所谓光子暗化(Photo-darkening)效应^[10], 而掺杂光纤的基质为玻璃, 因而也可能存在类似的光子暗化效应, 例如, 掺铊光纤中就已发现了光子暗化效应^[11]. 最近, 人们开始重视在高浓度 YDF 中调查这一效应^[12].

本文利用光纤激光器和放大器实验方案, 通过研究激光器的阈值和输出功率特性、以及放大器的

输出谱特性, 对高浓度 YDF 的光子暗化效应进行了研究. 实验结果表明, YDF 的功率转换效率存在着随泵浦光作用时间的增加而减小的现象, 该现象来源于光子暗化效应, 它引起了 YDF 对光波的附加损耗, 且这种损耗随泵浦作用时间的增加而增大, 其形成过程是单调不可逆的, 并随泵浦作用时间增加而逐渐趋于稳定.

1 实验方案

分别采用图 1 的光纤激光器和放大器方案, 通过定量测量激光器的阈值和输出功率特性、以及放大器的输出谱特性, 以研究高浓度 YDF 中的光子暗化效应. 在图 1(a)的激光器方案中, FBG 和 Sagnac 光纤环境构成线形激光谐振腔, FBG 的中心波长为 1065 nm, 反射率为 93.3%, Sagnac 光纤环境由中心波长处于 1060 nm 的 3 dB 耦合器构成, 最大输出功率为 200 mW 的 975 nm 半导体激光器(LD)用作光纤激光器的泵浦源. 考虑到 YDF 反向放大的自发辐射(ASE)在 975 nm 处强度较高, 经 980/1060 nm 波分复用耦合器(WDM)返回后将会影响泵浦 LD 的工作状态, 故采用如图所示的两个

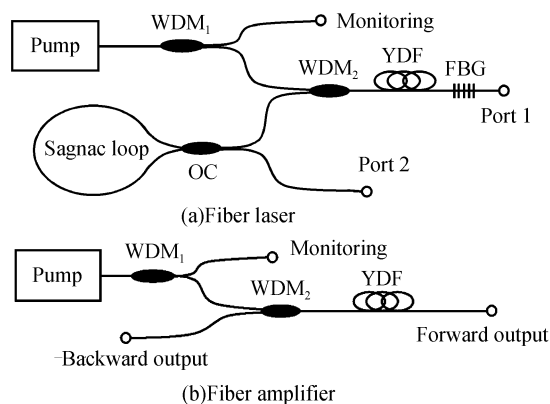


图 1 实验方案

Fig. 1 Schematic diagrams of experiments

* 中科院“百人计划”和国家自然科学基金(60677050)资助

** Tel: 0551-5593375 Email: mqinghe@aiofm.ac.cn

收稿日期: 2005-12-31

WDM 为 YDF 提供泵浦. 这样, WDM1 的信号端可以用来监测泵浦源的稳定性. Port 1 和 Port 2 均可用作激光输出端. 在图 1(b) 的光纤放大器中, 所用器件和泵浦方案均与图 1(a) 相同. 激光器和放大器所用的活性光纤为待研究的高掺杂浓度 YDF (加拿大 Coractive 公司商售产品), 均未受过任何泵浦辐射, 芯径约 $5\ \mu\text{m}$, 截止波长约 $775\ \text{nm}$, 数值孔径约 0.12 , 背景损耗小于 $40\ \text{dB/km}$, $974\ \text{nm}$ 处的吸收系数大于 $800\ \text{dB/m}$ (可见该 YDF 具有很高的掺杂浓度). 实验采用一台光谱分析仪 (Agilent 86140B) 和两台光功率计 (EXFO FPM-300) 分别分析光谱与测量光功率.

2 实验结果与讨论

首先研究了图 1(a) 的光纤激光器阈值特性. 实验所用的 YDF 长度为 $25\ \text{cm}$. 当泵浦功率达到 $60\ \text{mW}$ 时, 开始出现激光振荡, 经光谱分析仪观察, 发现激光振荡在数分钟后停止; 继续增加泵浦功率, 振荡恢复, 经数分钟后振荡再次停止, 如此反复. 图 2 给出了测得的激光器阈值随时间的变化. 由图可见, 激光器阈值随时间呈缓慢上升趋势, 初始阶段, 阈值增加的速度较快, 随着时间的增加, 阈值增大的速度逐渐趋于缓慢, 并在约 $6\ \text{h}$ 后趋于稳定, 约为 $99.2\ \text{mW}$, 这比最初时的阈值 ($60\ \text{mW}$) 增加了约 $40\ \text{mW}$. 实验还发现, 在激光器阈值未达到 $99.2\ \text{mW}$ 之前, 如先关闭泵浦源, 经一段时间后再开启, 激光器的阈值并不返回到最初值 ($60\ \text{mW}$), 而是从泵浦源关闭时所对应的阈值附近开始, 重新经历上述阈值增加的过程, 并且, 重新开启时的激光器阈值对泵浦源关闭时间的长短并不敏感. 表明这种激光器阈值增加的现象具有不可恢复的特性, 为不可逆过程.

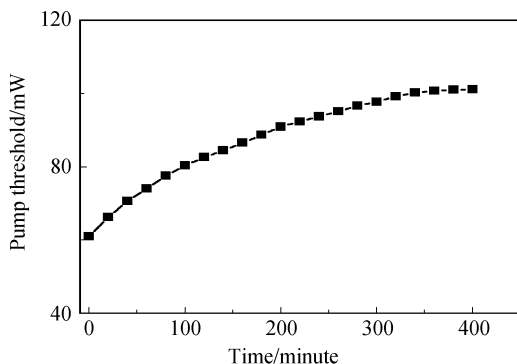


图 2 光纤激光器阈值随时间的变化关系

Fig. 2 Threshold of the fiber laser as a function of the pumping time

接着, 重新更换了一段长度相同且未经泵浦的 YDF, 在一定泵浦功率下, 研究了激光器的输出行为. 图 3 给出了在 $120\ \text{mW}$ 泵浦功率下在 Port 1 处

测得的输出功率及其波动与时间之间的变化关系. 从图中可以看出, 输出功率随时间呈单调下降, 在开始的 $1\ \text{h}$ 内, 输出功率从 $970\ \mu\text{W}$ 快速下降至 $300\ \mu\text{W}$ 附近, 然后, 下降速度趋于缓慢, 经 $6\ \text{h}$ 后, 稳定在 $150\ \mu\text{W}$ 附近, 这种输出功率随时间增加而下降的变化过程与激光器阈值随时间增加而上升的变化关系相吻合. 由图还可以看出, 激光器在开始阶段很不稳定, 其输出功率的波动较大, 但波动幅度随时间增加而逐渐减小, 经约 $6\ \text{h}$ 后, 这种幅度波动逐渐降至约 $20\ \mu\text{W}$ 以内. 此外, 实验发现, 图 3 的这种输出功率与时间之间的变化关系也是不可逆过程.

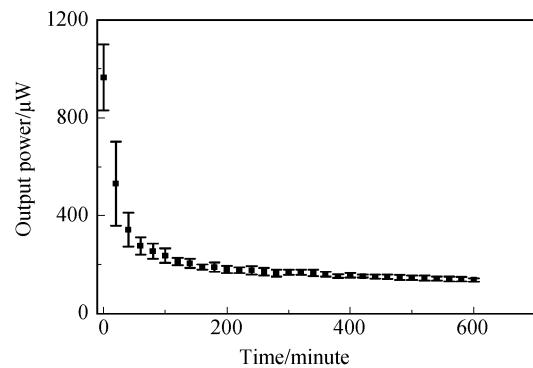


图 3 泵浦功率为 $120\ \text{mW}$ 时光纤激光器输出功率及其波动随时间的变化关系

Fig. 3 Output power and its fluctuation of the fiber laser as a function of the pumping time for a pump power of $120\ \text{mW}$

值得指出的是, 用光功率计在 WDM1 信号端对泵浦源的监测结果表明, 泵浦源在上述关于激光器阈值和输出功率的实验过程中一直稳定. 利用光谱分析仪对激光器的输出测量结果显示, 在该光谱仪可测量的光谱范围内未出现频率搬移现象; 此外, 利用环形腔结构方案, 激光器阈值和输出功率随时间也有类似的变化关系, 表明这种效应与激光器结构方案无关.

为了消除激光器谐振腔可能产生的不利影响, 直接采用图 1(b) 的光纤放大器方案, 进一步研究了高掺杂浓度 YDF 的这种功率转换效率随时间变化的行为. 实验中, 再次更换了一段长约 $25\ \text{cm}$ 且未经泵浦的高掺杂浓度 YDF, 利用光谱分析仪分别观察记录空载光纤放大器的前向和后向 ASE 输出谱. 图 4 给出了在 $100\ \text{mW}$ 的泵浦功率下不同时刻所记录的前向和后向 ASE 输出谱, 其中位于 $1088\ \text{nm}$ 附近的不连续小尖峰是由光谱分析仪本身带来. 由图可见, 前向和后向 ASE 功率均随时间不断下降, 且开始时下降速度快, 然后逐渐变缓, 但是, 前向和后向 ASE 功率下降的速度不同, 前向和后向 ASE 峰值在开始 $1\ \text{h}$ 内分别下降了 6.5 和 $9\ \text{dB}$, $2\ \text{h}$ 后, 后向 ASE 功率已基本趋于稳定, 但前向 ASE 功率依

然逐渐下降,直到6 h后才趋于稳定. 与光纤激光器实验相同,这种 ASE 功率下降也是不可逆的. 此后,将所用的 YDF 两端对调,重新熔接到光纤放大器系统中,实验发现,这时前向和后向 ASE 功率都有所提高,但均不能达到图4中所示的开始时所能达到的 ASE 功率,且也同样经历缓慢下降直到数小时后逐渐稳定的不可逆过程. 必须指出,实验过程中,对泵浦光的监测表明泵浦源也一直稳定.

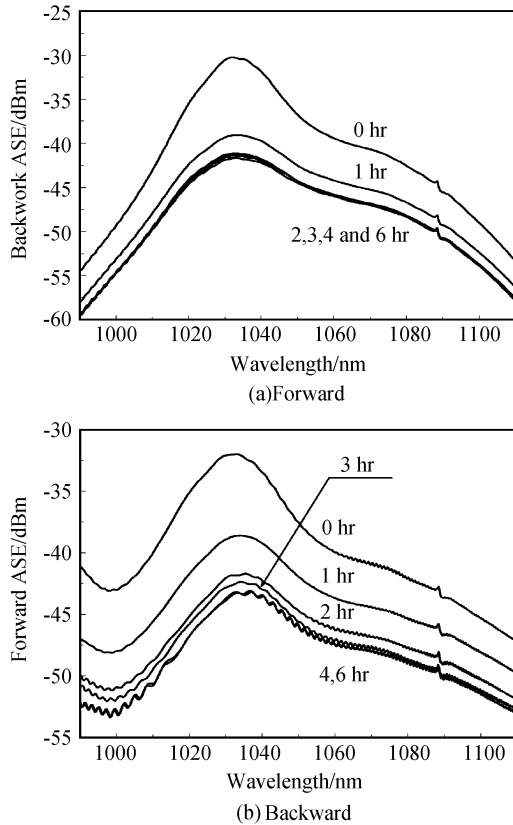


图4 100 mW 泵浦功率下在不同时刻测得的光纤放大器 ASE 输出谱

Fig. 4 ASE output spectra of the fiber amplifier at different pumping times for a pump power of 100 mW

在上述激光器和放大器实验中,功率转换效率都存在着随泵浦光作用时间增加而减弱的现象. 由于实验中对泵浦光的监测结果表明泵浦源一直处于稳定工作状态,而且,在激光器输出端 Port 1 和放大器正向输出端均未发现剩余泵浦光的增加(考虑到 YDF 吸收系数较高,难以检测剩余泵浦光,又使用了长度小于 10 cm 的 YDF 进行实验,但仍未观察到剩余泵浦光的增加),因此,这种功率转换效率随泵浦光作用时间增加而减弱的现象并不是由于泵浦吸收效应减弱造成的,而是存在着某种损耗机制,且该损耗是一种不可逆过程造成的永久性损耗. 另一方面,在激光器输出端 Port 2 和放大器反向输出端也均未观察到任何泵浦光功率随时间的增加;同时,实验中,当在泵浦输入端附近对 YDF 施加轴向拉

力时,在激光器和放大器各自的两个输出端也均未检测到任何输出的明显改变,这就消除了泵浦光在 YDF 中形成自写入光栅的可能. 因此,在激光器和放大器中功率转换效率随泵浦光作用时间增加而减弱的现象应源于 YDF 的光子暗化效应,即 YDF 在泵浦光(也包括所产生的激光或信号光)的作用下, YDF 受到的一种永久的、不可恢复的损伤,这种损伤可能是由于高能光子的作用、或者是因为信号光和泵浦光的多光子吸收造成的^[12].

事实上,前述光纤激光器和放大器的实验现象都可由光子暗化效应解释. 对于光纤激光器,阈值逐渐上升和输出功率逐渐下降均可认为由于光子暗化效应导致了 YDF 非吸收损耗逐渐增大所造成. 随着泵浦作用时间的增加, YDF 的光子暗化效应趋于完成,从而使得激光器阈值和输出功率趋于稳定. 同样,在光纤放大器中,由于 YDF 光子暗化效应导致了非吸收损耗的逐渐增大,从而使输出 ASE 功率不断下降. 随着光子暗化效应的逐渐完成, ASE 输出也趋于稳定,并且,由于泵浦光强度决定了 YDF 光子暗化效应的快慢,使得反向 ASE 比正向 ASE 更快地趋于稳定. 而在光纤放大器中对调 YDF 的方向后,则是因为原 YDF 泵浦输出端附近的泵浦功率不足尚未使其光子暗化效应结束,从而使得对调后 ASE 功率有所上升(但仍低于对调前开始时的水平),但随着泵浦作用的持续, YDF 光子暗化效应的完成, ASE 功率又经逐渐下降直至最终稳定.

3 结论

将目前典型商售高浓度 YDF 分别应用于光纤激光器和放大器系统中,通过测量激光器阈值和输出功率、空载放大器的前向和后向 ASE 输出谱,发现所用 YDF 的功率转换效率都存在着随泵浦光作用时间增加而减小的现象,该现象来源于光子暗化效应,它引起了 YDF 对光波(泵浦光、激光或信号光)的附加损耗,且这种损耗随泵浦作用时间的增加而增大,其形成过程是单调不可逆的,并随泵浦作用时间增加而逐渐趋于稳定. 因此,设计基于高掺杂浓度 YDF 的激光器件时,必须考虑光子暗化效应的影响.

致谢:感谢实验室冯素娟、王执山、李晓芹等同学的帮助.

参考文献

- [1] BALL G A, MOREY W W, GLENN W H. Standing-wave monomode erbium fiber laser[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1991, 3(7): 613-615.
- [2] WANG A T, MING H, Xie J P, *et al.* Single-frequency Q-switched erbium-doped fiber ring laser by combination of a

- distributed Bragg reflector laser and a Mach-Zender interferometer[J]. *Applied Optics*, 2003, **42**(18):3528-3530.
- [3] YANG Ling-zhen, CHEN Guo-fu, WANG Yi-shan, *et al.* Experimental of study of ultrashort pulse Yb^{3+} -doped fiber laser. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(3):333-335.
杨玲珍,陈国夫,王屹山,等.超短脉冲掺 Yb^{3+} 光纤激光器实验研究[J]. *光子学报*, 2005, **34**(3):333-335.
- [4] MAO Q H, LIT J W Y. Multiwavelength erbium-doped fiber lasers with cascaded FBG actively overlapping cavities [J]. *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, 2003, **20**(1): 160-169.
- [5] NILSSON J, ALAM S U, ALVAREZ-CHAVEZ J A, *et al.* High-power and tunable operation of erbium-ytterbium codoped cladding-pumped fiber lasers [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2003, **39**(8):987-994.
- [6] BELLEMARE A. Continuous-wave silica-based erbium-doped fibre lasers[J]. *Progress in Quantum Electronics*, 2003, **27**(4): 211-266.
- [7] KRINGLEBOTN J T, ARCHAMBAULT J L, REEKIE L, *et al.* Er^{3+} Yb^{3+} codoped fiber distributed-feedback laser [J]. *Optics Letters*, 1994, **19**(24):2101-2103.
- [8] ASSEH A, STOROY H, KRINGLEBOTN J T, *et al.* 10 cm Yb^{3+} DFB fiber laser with permanent phase-shifted grating [J]. *Electronics Letters*, 1995, **31**(12):969-970.
- [9] PASCHOTTA R, NISSON J, BARBER P R, *et al.* Lifetime quenching in Yb-doped fibres [J]. *Optics Communications*, 1997, **136**(4):375-378.
- [10] BROER M M, KROL D M, DIGIOVANNI D J. Highly nonlinear near-resonant photodarkening in a thulium-doped aluminosilicate glass fiber[J]. *Optics Letters*, 1993, **18**(10): 799-801.
- [11] BARBER P R, PASCHOTTA R, TROPPER A C, *et al.* Infrared-induced photodarkening in Tm-doped fluoride fibers [J]. *Optics Letters*, 1995, **20**(21):2195-2197.
- [12] KOPONEN J, SODERLUND M, TAMMELA S, *et al.* Photodarkening in ytterbium-doped silica fibers[J]. *SPIE*, 2005, **5990**:599008_1-599008_10.

Photodarkening in Ytterbium-doped Fiber with High Doping Concentration

ZHU Zong-jiu¹, XU Li-xin², MAO Qing-he¹, LIU Wen-qing¹

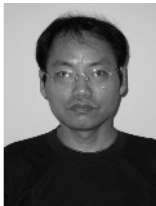
(1 *Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031*)

(2 *Department of Physics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026*)

Received date: 2005-12-31

Abstract The photodarkening in a commercial ytterbium-doped fiber (YDF) with high doping concentration was investigated. When the YDF was respectively used in a fiber laser and an amplifier, by measuring the threshold and output power of the laser, and the output spectra of the amplifier, it was found that the power conversion efficiency of the YDF decreases over the pumping time. Moreover, the decrease of power conversion efficiency was a monotonic and irreversible process. The decreasing may be gradually vanished as the pumping time increases.

Key words Doping concentration; Ytterbium-doped fiber; Photodarkening; Fiber laser; Fiber amplifier



ZHU Zong-jiu was born in Anhui Province, China. He received his B. S. and M. S. degrees from the University of Electronic Science and Technology of China and Zhejiang University respectively. He is in Anhui University of Science and Technology as an associate professor, and currently is studying for his Ph. D. at Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences. His research interests are fiber optics, fiber lasers and fiber communications.